

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ОТКЛИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В НАГРУЖЕННЫХ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД И ВНЕШНЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Пантелеев И.А.¹, Гаврилов В.А.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, ria@icmtt.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

Ранее авторским коллективом было высказано предположение, что модулирующее воздействие слабых электромагнитных полей на интенсивность ГАЭ, обнаруженное при анализе результатов комплексных скважинных измерений, связано с изменениями сил вязкого трения между подвижной частью жидкого флюида и поверхностью твердой фазы двойного электрического слоя. Изменения сил вязкого трения происходят с частотой внешнего электрического поля и с амплитудой, пропорциональной амплитуде напряженности этого поля. В масштабе макрообъема геосреды периодическое уменьшение сил трения на берегах трещин, границах зерен, конгломератов и гранул способствует увеличению числа актов акустической (геоакустической) эмиссии, являющихся следствием процессов перестройки дефектной структуры геосреды на широком спектре пространственных масштабов под воздействием действующих механических напряжений. Одним из возможных путей для проверки данного предположения является физическое моделирование исследуемого явления, широко используемое в науках о Земле.

Ранее в ряде работ [1,2] в экспериментах по электромагнитному воздействию на горные породы было показано, что отклик акустической эмиссии на внешнее слабое электромагнитное воздействие устойчиво наблюдается уже при величине приложенной нагрузки равной половине от предельного уровня. При этом наличие этого отклика не зависит от степени флюидонасыщенности образца, характера его деформирования (хрупкое, пластичное) и наличия в составе породы минералов, проявляющих пьезоэлектрические свойства. Перечисленные параметры влияют лишь на амплитуду отклика и время задержки его появления. Также в результате проведенного большого количества экспериментов на образцах различных горных пород с различными физическими и механическими свойствами было показано, что в случае фиксированной нагрузки повторное воздействие внешним электромагнитным полем не приводит к повторному отклику акустической эмиссии. Этот экспериментальный факт авторами объяснялся тем, что распределенные в образце локальные чувствительные к воздействию зоны релаксируют (эволюционируют) во время первого сеанса воздействия и к моменту повторного воздействия потенциальные источники акустической эмиссии, способные отреагировать на это воздействие, отсутствуют.

Однако в реальной ситуации геосреда, окружающая скважину, находится в состоянии постоянного хоть и малого по сравнению с предельным уровнем изменения своего напряженно-деформированного состояния. Причинами этих изменений являются фильтрационные процессы, приливные воздействия, иные волновые воздействия естественного и техногенного происхождения, вариации атмосферных фронтов и т.д. В связи с этим можно утверждать, что в реальной геосреде, учитывая уровень плотности несплошностей среды различных пространственных масштабов (трещины, границы зерен, кристаллов, гранул, каверны, поры, границы блоков и т.д.), существует огромное счетное количество локальных областей, чувствительных к внешнему слабому электромагнитному воздействию. Поэтому была поставлена задача экспериментального обнаружения повторных откликов акустической эмиссии (АЭ) на периодическое внешнее воздействие слабого электромагнитного поля.

Постановка эксперимента.

Для проведения лабораторных испытаний на воздействие слабого (по сравнению с электромагнитным воздействием вызывающим электрической пробой) электромагнитного поля на территории Камчатского геодинимического полигона были отобраны образцы аргиллитовой породы, преобладающей на глубине установки геофона измерительной скважины Г-1 (1000 м.) [4]. Порода представляет собой метатугаргиллит с микропрожилками кварца, мощность которых колеблется в

пределах от долей миллиметра до 1.5 миллиметров. После этого из отобранных экземпляров были нарезаны призматические образцы с основанием 50x50 мм. (± 0.4 мм.) и высотой от 50 до 70 миллиметров.

Существенным положением предложенного авторами теоретического подхода для объяснения физических механизмов модуляции внешним электромагнитным излучением уровня геоакустической эмиссии [3,4], является главенствующая роль проводящего флюида, находящегося как в связанном, так и свободном состояниях в породе. Поэтому перед испытаниями все образцы аргиллита подвергались насыщению водным раствором хлорида натрия с концентрацией 12г/л. Для принудительного насыщения образец помещался в емкость с раствором, из которой потом откачивался воздух до относительного давления -0.95 бар, и выдерживался при таком давлении в течение суток. После насыщения на образец устанавливались графитовые электроды и датчик акустической эмиссии, а боковые грани покрывались толстым слоем силиконового герметика для предотвращения высыхания образца. Итоговая влажность образцов аргиллита составила 0,25 %.

Внешнее электрическое воздействие на образец осуществлялось путем подачи на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца, переменного напряжения от генератора сигналов произвольной формы АКПП-3407/1А, усиленного при помощи усилителя Taborg 9400 с коэффициентом усиления 50. Параметры электрических импульсов при этом составляли: вид – двухчастотный сигнал положительной полярности, представляющий собой произведение синусоидального сигнала с частотой 480 Гц и амплитудой на выходе генератора 3 В от пика до пика, и прямоугольных импульсов с частотой следований 5.2 кГц и амплитудой 0.75 В от пика до пика, смещение итогового сигнала составило 840 мВ на выходе генератора. Амплитуда напряжения сигнала, подаваемого на графитовые электроды, составляла порядка 120 вольт. Воздействующий сигнал выбран двухчастотным из соображений увеличения удельной электрической энергии, подводимой к образцу. Для улучшения электрического контакта на границе порода – графитовый электрод до процедуры насыщения образца площадки для установки электродов покрывались тройным слоем проводящего графитового лака.

Для непрерывного мониторинга акустоэмиссионной активности в процессе испытания образцов была использована система Amsy-5 Vallen (Германия), укомплектованная широкополосным пьезоэлектрическим датчиком DECI SE2MEG-P (частотный диапазон 200-2000 кГц). реализации механической нагрузки была использована электромеханическая машина Shimadzu AGX-Plus с максимальным усилием 30 тонн. Испытания проводились по ступенчатой схеме. Каждый образец подвергался одноосному сжатию со скоростью деформирования 0.06 мм/мин до некоторого заданного усилия, при котором он выдерживался в течение 80 минут, после чего снова следовал участок активного сжатия до следующей ступени. Всего в течение испытания было предусмотрено три ступени с уровнями приложенной нагрузки 5, 7 и 9 тонн. На каждой ступени после 20 минут выдержки для релаксации переходных процессов, связанных с пригрузкой, следовало три сеанса электровоздействия длительностью 10 минут и паузой между сеансами 10 минут. Фиксация на каждой ступени приложенного усилия, а не перемещения, выбрана сознательно, так как приводит к необходимости постепенного поддавливания образца в течение ступени, а как следствие к минимизации релаксационных процессов. После окончания эксперимента все зарегистрированные импульсы акустической эмиссии подвергались многопараметрической фильтрации с целью отсеивания периодического механического шума и синтетических сигналов, вызванных электромагнитными наводками.

Результаты испытания аргиллита.

Для выявления изменений в следовании акустической эмиссии, вызванных сеансами электровоздействия, были построены зависимости активности АЭ (рис. 1.) В результате анализа представленных зависимостей можно сделать ряд выводов:

- 1) при уровне приложенной нагрузки 5 тонн периодическое воздействие электрического поля на образец не вызывает отклика в акустической эмиссии;
- 2) на второй ступени, при уровне нагрузки 7 тонн, второе и третье десятиминутное воздействие вызывает незначительный прирост активности АЭ, тогда как на первом интервале воздействия уровень АЭ соизмерим с фоновым уровнем на этапе релаксации после пригрузки;
- 3) во время первого интервала воздействия, при уровне приложенной нагрузки равной 9 тоннам, происходит существенная активизация акустической эмиссии, тогда как на последующих интервалах уровень АЭ соответствует фоновому значению.

Анализ изменения распределения импульсов АЭ по максимальной амплитуде с течением времени показал, что:

- на активных участках деформирования с ростом сжимающего усилия происходит расширение границ распределения импульсов АЭ по максимальной амплитуде в сторону больших величин, что указывает на рост характерных геометрических размеров источников АЭ;
- на ступенях фиксированной нагрузки происходит постепенное сужение распределения импульсов АЭ по амплитуде в сторону малых величин, что соответствует процессу релаксации;
- распределение импульсов АЭ во время существенной активизации АЭ на третьей ступени первом интервале электровоздействия отличается от участков активного деформирования отсутствием высокоамплитудных событий. Это указывает на то, что источники АЭ, среагировавшие на внешнее воздействие, имеют малые геометрические размеры (размер образовавшегося дефекта, прирост размера существующего дефекта).

Дополнительно для выявления особенностей следования акустической эмиссии при деформировании аргиллита был проведен анализ амплитудно-частотных характеристик волновых форм импульсов АЭ. В качестве информативных параметров были выбраны медианная частота и частота максимума спектра импульса АЭ. Изменение медианной частоты характеризует относительное увеличение высокочастотной или низкочастотной составляющей в исходном сигнале. В свою очередь частота максимума спектра определяет опорную (преобладающую) частоту одиночного сигнала.

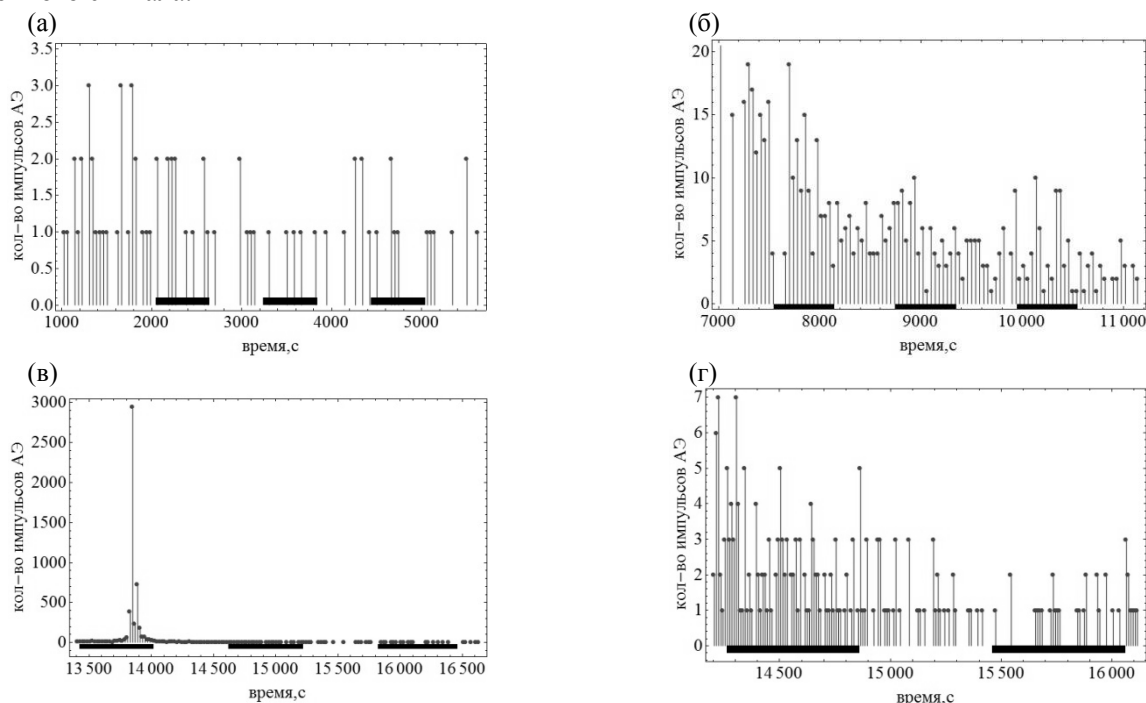


Рис. 1. Активность акустической эмиссии на первой (а), второй (б) и третьей (в) ступенях (на рисунке (г) приведена активность для второго и третьего интервала электровоздействия третьей ступени; прямоугольниками указаны интервалы электровоздействия).

В результате проведенных экспериментов было показано, что периодическое (повторное) электромагнитное воздействие на нагруженный флюидонасыщенный образец аргиллита не вызывает устойчивого сопутствующего отклика в следовании акустической эмиссии, что по мнению авторов связано с морфологией исследуемых образцов. Испытанные серые аргиллиты представляют собой монолитную глинистую породу с прожилками и зацементированными трещинами существенной толщины, пересекающими образцы насквозь. Данные макродефекты являются основными носителями неупругой деформации и основными чувствительными к внешнему электромагнитному воздействию зонами. Вскрытие образца после окончания эксперимента показывает, что магистральные трещины образовались в существующих до нагружения плоскостях прожилок и зацементированных полос. Таким образом, получается, что на лабораторном масштабе, когда образцы имеют очень ограниченное количество априори существующих макродефектов, которые и определяют характер разрушения, количество потенциальных чувствительных к внешнему воздействию зон также очень ограничено и связано с этими макродефектами. При этом внешнее

электромагнитное воздействие либо не влияет на процесс деформирования этих дефектов, либо при первом же воздействии вызывает надежно регистрируемый отклик в виде акустической эмиссии переводя их в разряд не чувствительных к последующим воздействиям. Для проверки выдвинутого предположения авторами была реализована серия таких же экспериментов на образцах скальной породы – гранита, которая в отличие от осадочных пород имеет кристаллическое строение. Предполагалось, что высокая по сравнению с аргиллитами плотность дефектов кристаллической структуры (микротрещин, пор, границ кристаллов и зерен) позволит в схожих условиях получить более значимый отклик на периодическое воздействие внешнего электромагнитного поля.

Результаты испытания гранитных образцов.

Для исследования влияния естественной дефектной структуры горных пород и степени флюидонасыщенности на отклик акустической эмиссии при внешнем периодическом электромагнитном воздействии была проведена серия экспериментов по ступенчатому деформированию призматических образцов гранита месторождения Каинда (Киргизия) с размерами 50x25x100 мм естественной влажности и после флюидонасыщения. Условия и параметры нагружения, воздействия и насыщения были идентичными экспериментам с аргиллитами за исключением количества ступеней. В каждом эксперименте их было пять с усилием, возрастающим от 7 до 15 тонн.

Из графика активности АЭ, построенного для всего времени деформирования (рис. 2), видно, что активность акустической эмиссии на стадиях пригрузки существенно выше, чем во время воздействия внешнего электромагнитного поля. Исключение составляет лишь первый интервал воздействия на четвертой ступени (приложенное усилие 11 тонн), когда произошла резкая активизация акустической эмиссии.

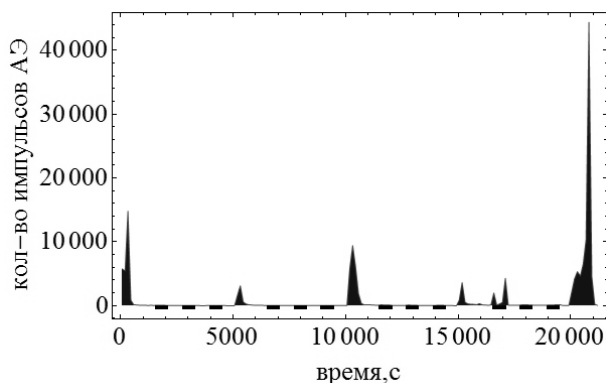


Рис. 2. Активность акустической эмиссии в процессе деформирования образца гранита Каинда естественной влажности.

Анализ активности акустической эмиссии на ступенях фиксированного приложенного усилия (рис. 3.) показал, что на каждом без исключения интервале воздействия наблюдается всплеск уровня активности акустической эмиссии (от 3 до 11 раз выше уровень активности по сравнению с фоном вне интервалов воздействия). Форма распределения импульсов АЭ по максимальной амплитуде не претерпевает существенного изменения в течение процесса деформирования, в отличие от аргиллитов. Хотя резкая активизация на первом интервале воздействия четвертой ступени характеризуется следованием сугубо низкоамплитудных импульсов АЭ.

Полученный авторским коллективом в экспериментах на гранитных образцах с периодическим электромагнитным воздействием результат показал, что выдвинутое ими предположение о не представительности аргиллитовых пород ввиду малого количества дефектов и потенциально чувствительных к электромагнитному воздействию зон подтверждается. Проведенный анализ амплитудно-частотных характеристик волновых форм импульсов АЭ, зарегистрированных в экспериментах на флюидонасыщенных гранитных образцах и образцах естественной влажности, позволил установить характер влияния степени флюидонасыщенности образцов на параметры регистрируемых импульсов АЭ.

Заключение.

Проведенный цикл экспериментальных работ по исследованию откликов акустической эмиссии нагруженных образцов горных пород на периодическое воздействие слабого электрического

поля позволил зарегистрировать повторную активизацию АЭ при повторном электровоздействии, а также выявить ряд закономерностей исследуемого процесса:

- возможность регистрации отклика акустической эмиссии на повторное воздействие слабого электромагнитного поля при фиксированной приложенной нагрузке зависит от плотности дефектов строения образца испытываемой горной породы, являющихся потенциально чувствительными к внешнему электрическому воздействию зонами;
- степень влажности образцов гранита не влияет на появление или отсутствие повторного отклика акустической эмиссии при периодическом электровоздействии, однако, влияет на амплитудно-частотные характеристики этого отклика и в целом на процесс следования акустической эмиссии;
- для принудительно насыщенных водным раствором хлорида натрия образцов осадочных (аргиллиты) и скальных (граниты) горных пород наблюдаются характерные тенденции в изменении амплитудно-частотных характеристик импульсов акустической эмиссии с ростом приложенной нагрузки. С увеличением приложенной нагрузки происходит расширение границ распределения импульсов АЭ по максимальной амплитуде в сторону больших амплитуд, смещение максимума распределения импульсов АЭ по частоте максимума спектра в сторону более низких частот, появление высокочастотной составляющей в данном распределении (>600 кГц), расширение границ распределения импульсов АЭ по медианной частоте в обоих направлениях (в сторону высоких и низких частот). Все эти изменения определяются сценарием роста и развития дефектов горных пород на широком спектре пространственных масштабов, который, судя по полученным данным, существенно различается для принудительно насыщенных пород и пород естественной влажности.

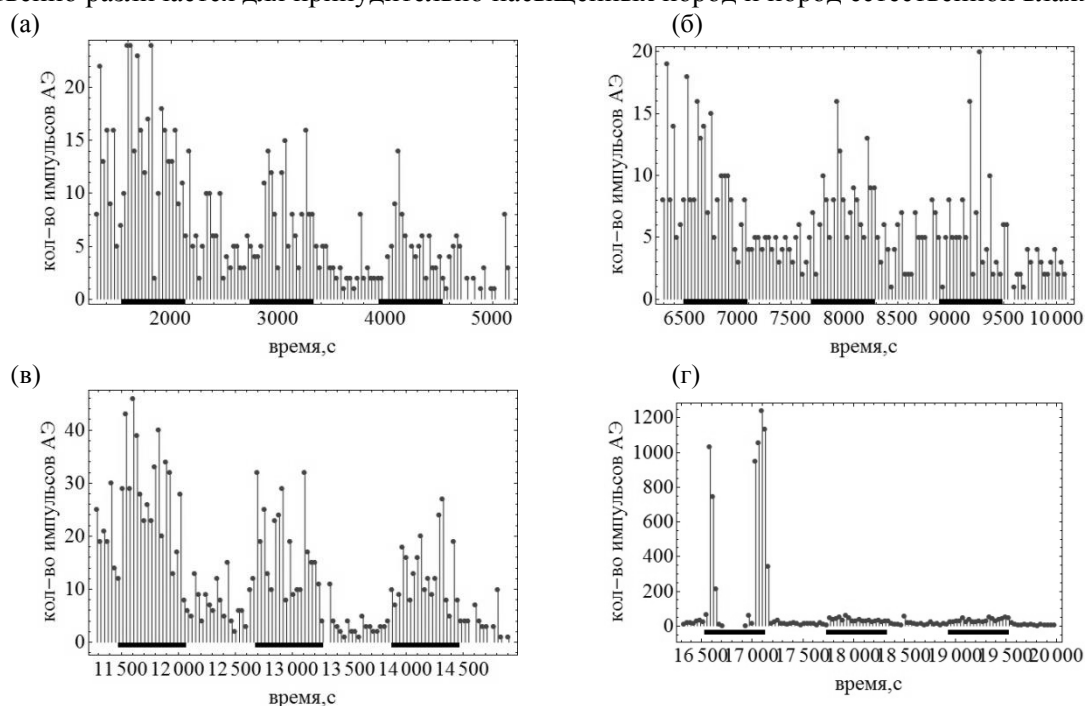


Рис. 3. Активность акустической эмиссии на первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) ступенях (прямоугольниками указаны интервалы электровоздействия).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-05-03225_a).

Список литературы

1. Боровский Б.В., Богомолов Л.М., Закупин Б.В., Мубассарова В.А. К вопросу о стимулировании акустической эмиссии образцов геоматериалов электромагнитными полями // Физика Земли. 2011. № 10. С. 71-81.
2. Гаврилов В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С. Сравнение результатов скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натурных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы // Физика Земли. 2011. №11. С.63-74.
3. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Земли. 2014. № 1. С. 89-103.
4. Gavrilov V. A., Panteleev I. A., Ryabinin G. V., Morozova Yu. V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoaoustic emission of rocks // Russian Journal of Earth Science. 2013. V. 13, ES1002. doi:10.2205/2013ES000527.